



Kompaktering av bark vid olika temperaturer och tryck

– Förändring av barkdensiteten vid olika temperaturer och
tryck

*Compacting of bark at different temperatures and pressures
– Change of bark density at different temperatures and pressures*

Hugo Eriksson & Gustav Ångman

Självständigt arbete i skogsvetenskap • 15 hp
Sveriges Lantbruksuniversitet, SLU
Jägmästarprogrammet
Umeå 2020



Kompaktering av bark vid olika temperaturer och tryck
- Förändring av barkdensiteten vid olika temperaturer och tryck

Compacting of bark at different temperatures and pressures
– Change of bark density at different temperatures and pressures

Hugo Eriksson & Gustav Ångman

Handledare: Erik Anerud, Sveriges Lantbruksuniversitet, Skogens Biomaterial och Teknologi (SBT)

Examinator: Tommy Mörling, Sveriges Lantbruksuniversitet, Skogens Ekologi och Skötsel

Omfattning: 15 hp

Nivå och fördjupning: Grundnivå, G2E

Kurstitel: Kandidatarbete i skogsvetenskap

Kurskod: EX0911

Program/utbildning: Jägmästarprogrammet

Kursansvarig inst.: Institutionen för skogens ekologi och skötsel

Utgivningsort: Umeå

Utgivningsår: 2020

Omslagsbild: Erik Anerud

Serietitel: Kandidatarbeten i Skogsvetenskap

Delnummer i serien: 2020:10

Nyckelord: Densitetsförändring, Biobränsle, Substansförluster, Lagring, Kompaktering, Temperatur, Tryck

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för skogsvetenskap

Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Fulltexten kommer dock i samband med att dokumentet laddas upp arkiveras digitalt.

Om ni är fler än en person som skrivit arbetet så gäller krysset för alla författare, ni behöver alltså vara överens. Mer information om publicering och arkivering går att hitta här: <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

☒ JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

☐ NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.

Sammanfattning

Bark är en restprodukt från skogsindustrierna som framförallt används för värme- och elproduktion. Fukthalten är normalt sett högre i bark än i stamved, vilket medför ett lägre effektivt värmevärde och en sämre bränslekvalitet. Den vanligaste metoden för att minska fukthalten och därigenom höja bränslekvaliteten är att lagra bark. Lagring av sönderdelade biobränslen medför risker kopplade till värmeutveckling, så som substans- och energiförluster. Processerna under lagring är väldokumenterade, men en aspekt som tidigare inte undersökts är hur bark kompakteras vid olika temperaturer och tryck. Detta kan i sin tur påverka permeabiliteten i stackar under lagring. Genom att undersöka kompaktering vid olika temperaturer och tryck går det att beräkna fram en teoretisk modell på hur aktiviteten i stacken varit.

Syftet med denna studie var att undersöka hur bark kompakteras vid olika temperaturer och tryck som uppstår i en stack under lagring. Syftet var även att utvärdera metoderna för att uppskatta substansförlusterna med metoden att använda nätpåsar med en mindre del av materialet jämfört med att väga allt material i torr ton. För att undersöka kompaktering vid olika temperaturer genomfördes laborieförsök i 0°C, 30°C och 50°C. Barken som användes vid försöket var från tall (*Pinus Sylvestris*).

Resultatet från studien visade att bark kompakterades till olika grad beroende på temperatur och tryckbelastning. Olika temperaturer och tryck gav olika kompakteringsgrader. Kompakteringsgraden var högst vid 50 °C och lägst vid 0°C. Skillnaden mellan de olika metoderna för att beräkna substansförluster var liten. Från studien kan det konstateras att bark kompakteras olika mycket beroende på temperatur och tryck. Metoden att väga allt material i torr ton är i princip lika bra som att använda nätpåsar.

Nyckelord: Densitetförändring, Biobränsle, Substansförluster, Lagring, Kompaktering, Temperatur, Tryck

Abstract

Bark is a residual product from the forest industry, which is primarily used for heat and electricity production. The moisture content is normally higher in bark than in logs, which results in lower effective heat value and poor fuel quality. The most common method of reducing moisture content and thereby increasing fuel quality is to store bark. Storage of decomposed biofuels entails risks associated with heat generation such as loss of substance and energy. The processes during storage are well documented but one aspect that has not previously been investigated is how bark is compacted at different temperatures and pressures. This in turn, can affect the permeability of stacks during storage. By investigating compaction at different temperatures and pressures, it's possible to calculate a theoretical model of the activity in the stack.

The purpose of this study was to investigate how bark is compacted at different temperatures and pressures that occur in a stack during storage. The purpose was also to evaluate the methods for estimating the loss of substance with the method of having net bags with a smaller amount of material compared to weighing all material in dry tone. The laboratory experiments were performed at 0°C, 30°C and 50°C to investigate compaction at different temperatures. The bark used in the experiment was from scots pine (*Pinus Sylvestris*).

The results from the study showed that bark was compacted differently at different temperatures and pressure. Different temperatures pressures gave different compaction grade. The compaction rate was highest at 50°C and lowest at 0°C. The difference between the different methods for calculating the loss of substance was minimal. From the study it can be found that bark is compacted very much depending on the temperature and pressure. The method of weighing all material in dry tone is equally as good as using mesh bags.

Keywords: Density change, Biofuel, Net losses, Storage, Compaction, Temperature, Pressure

Förord

Detta kandidatarbete omfattar 15 hp på C-nivå och är skrivet inom ämnet Bioenergi utfört på Jägmästarprogrammet i Umeå. Detta kandidatarbete är utfört på uppdrag av Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi (SBT) och har genomförts från februari 2020 till april 2020

Vi vill rikta ett stort tack till de personer som har hjälpt oss med fakta och information kring arbetet. Ett särskilt tack vill vi rikta till vår engagerade handledare Erik Anerud som alltid har ställt upp när vi behövt hjälp och har varit snabb på att svara på frågor. Vi vill även rikta ett tack till Eriks forskningsassistenter Christian Höök och Joel Jensen som har försätt oss med data.

Hoppas att detta blir en intressant läsning!

Umeå, april 2020

Hugo Eriksson och Gustav Ångman

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	9
1.1. Förnybara bränslen	9
1.2. Bark	10
1.3. Terminalhantering och lagring av bark	11
1.3.1. Risker vid lagring	12
1.4. Kompaktering	13
1.5. Volymskattning med drönare	14
1.6. Problemformulering	14
1.7. Syfte och mål	15
2. MATERIAL OCH METOD	16
2.1. Fältförsök	16
2.2. Volymmätning	17
2.3. Metod laboratorieförsök	17
2.3.1. Laboratorieförsök	17
2.4. Teoretisk beräkning av kompaktering	19
3. RESULTAT	22
3.1. Kompaktering av bark i 0°C, 30°C & 50°C	22
3.2. Naturlig kompaktering - Fältförsök	23
3.3. Teoretisk kompaktering av en stack	24
4. DISKUSSION	26
4.1. Kompaktering i labbmiljö	26
4.2. Naturlig kompaktering – Fältförsök	26
4.3. Teoretisk beräkning av kompaktering av stackar	28
4.4. Slutsats	28
5. REFERENSER	29

1. INLEDNING

Biobränslen, i form av GROT, flis, spån och bark, produceras under hela året. Behovet är dock till stora delar koncentrerat till perioden oktober-mars. Detta gör att lagring av biobränsle är en viktig förutsättning för att kunna trygga det fluktuerande bränslebehovet vid värme- och kraftvärmeverk. Bark, vilket huvudsakligen utgör en restprodukt från massa- och sågverksindustrin, har i regel en högre fukthalt än övriga skogsbränslen (Ringman 1995). Det innebär att bark i regel har en lägre energidensitet än andra skogsbränslen då det effektiva värmevärdet är positivt korrelerat med torrhalten. Generellt sett torkar biomassa under lagring och därför är lagring av bark en förutsättning för att erhålla en högre bränslekvalitet och en högre energidensitet. Lagring av bark sker framförallt på olika typer av terminaler. Lagringen kräver en väl avvägd bränsleplan med en stor terminalyta för att minska risken för platsbrist när stora volymer bark från sågverk- och massaindustrier inkommer samtidigt. Lagring av biomassa är dock förknippat med en rad olika problem kopplat till bränslekvalitet och leder, på grund av mikrobiell- och kemiskaktivitet, till substans- och energiförluster. Det påverkar i sin tur mängden utvinningsbar energi och därmed det ekonomiska utfallet. Idag råder en generell osäkerhet kring såväl den termiska aktiviteten, vilken kan leda till självantändning, som storleken på förlusterna efter lagring. Genom att studera förändringar inuti stackar kopplat mot förändringar av yttre mätbara parametrar, som volymförändring under lagringstiden kan kunskapen ökas kring aktiviteten inuti en stack. Detta innebär ett bättre underlag för att prognostisera energi- och substansförluster över tid. Därigenom skulle såväl risker som materiella förluster kunna minimeras samtidigt som arbetet med energiprognoser skulle kunna effektiviseras.

1.1. Förnybara bränslen

Fjärrvärme och elproduktion, som baseras på förnyelsebara bränslen, har under de senare åren ökat till följd av avfalls- och energipolitik i Sverige. En stor anledning till denna uppgång var införandet av en koldioxidskatt på fossila bränslen mellan åren 1990–2005. Oljepriset var under samma period högt, vilket bidrog till en ökad användning av förnyelsebara bränslen. Även införandet av ett elcertifikatsystem, vilket gynnat elproduktion från förnybara källor, har bidragit till en ökad

användning av biobränslen (Naturvårdsverket 2020). En omställning till biobränslen genom en utfasning av fossilbaserade bränslen har blivit allt viktigare för att nå upp till de internationella åtagandena. För att uppnå målen har Sverige antagit bland annat Parisavtalet, där Sverige ska bidra till att hålla den globala uppvärmningen på under 1,5 grader. (Prop. 2016/17:16)

Biobränslen anses vara förnybara och därmed mer hållbara än fossilbaserade bränslen. Den koldioxid som frigörs vid förbränning fixeras i växtdelar under en längre tid och därmed bidrar till en ökad biocirkulär ekonomi (Anerud *et al.* 2019). Biobränslen kan klassificeras utifrån ursprung och det är vanligt att biobränslena delas in i huvud- och undergrupper. Inom gruppen trädbränslen återfinns skogsbränslen, energiskogsbränsle och återvunnet bränsle. Undergruppen skogsbränslen som har ursprung direkt från skogen, kan delas in i primära och sekundära bränslen. Primära skogsbränslen utgörs främst av restprodukter, som grenar och toppar, efter slutavverkning eller gallring. Sekundära skogsbränslen är däremot till största delen restprodukter från sågverksindustrin, som bark, flis och sågspån (Lehtikangas *et al.* 1998). Primära- och sekundära skogsbränslen nyttjas såväl internt inom skogsindustrin, men även extern inom värme- och kraftvärmeverk, värmecentraler och småhussektorn (*Bränslehandboken 2012*).

1.2. Bark

Inom skogsindustrin blir ungefär 16 % av allt material bränsle, varav 8–10 % är bark och resterande del är spån och flis (Svenskt trä 2017). I Sverige härstammar barkresterna till största delen (95%) från barrträd och enbart en mycket liten del från lövträd. Bark klassificeras som ett sekundärt biobränsle då det faller ut som en restprodukt inom sågverks- och massaindustrin när timret eller massaveden avbarkas. Idag är användningsområdet för bark begränsat och till största delen går barken till energiproduktion i form av värme (Svenskt trä 2017). Bränsleegenskaperna för bark skiljer sig jämfört med andra biobränslen då bark, till skillnad från andra material, har en högre fukthalt. Fukthalten för bark ligger vanligtvis på 50–60%. (Ringman 1995). En förhöjd fukthalten beror till stor del på om virket våtlagrats eller inte innan postning. Stamved har däremot en lägre fukthalt, som vanligtvis ligger på omkring 50 % för nyskördad biomassa. Generellt sätt är askhalten högre i bark jämfört med stamved, vilket framförallt beror på föroreningar som grus, sten och sand. Detta leder till att värmevärdet blir lägre för bark jämfört mot andra biobränslen, omkring 1,55 MWh/ton (Ringman 1995). Bark innehåller en högre andel parenkymceller och fler sockerarter än andra biobränslen, samtidigt som andelen lignin, extraktivämnen, oorganiska ämnen och metaller är högre. En hög andel av dessa ämnen tillsammans med en högre andel

parenkymceller, medför att bark blir mer mottagliga för svampinfektioner. Beroende på trädart kan dock barken innehålla svampdödande medel, vilket gör att svampinfektionen hämmas (Anerud *et al.* 2019). Sammantaget gör barkens egenskaper betydligt svårare att lagra än andra biobränslen som exempel stamved.

1.3. Terminalhantering och lagring av bark

I och med att efterfrågan på biobränslen är störst under vinterhalvåret, samtidigt som produktionen pågår under hela året, gör det att stora lager byggs upp under i stort sett hela året. Bark lagras vanligtvis på terminaler, men även sågverk och slutanvändare kan lagra barken på såg- eller bränsleplaner. Fördelen med att lagra vid en sågverks- eller bränsleplan är möjligheten att kontrollera och samtidigt styra olika faser i lagringen som exempel fukthalt. Fukthalten går att styra genom att låta materialet vara täckt/otäckt eller under tak (Lehtikangas *et al.* 1998). Lagringsfasen är en av de viktigaste aspekterna och påverkar det slutgiltiga värmevärdet på materialet. Framförallt påverkas valet av lagringsmetod och lagringsplats av biologiska, ekonomiska och logistiska skäl (Anerud *et al.* 2019). En lagringsplats som ligger i bra anslutning till den slutgiltiga kunden är en fördel eftersom transporter, lagring och hantering kan effektiviseras (Olsson *et al.*, 2016).

Lagring av bark bör ske på plana, torra och fasta ytor för att minska risken för att föroreningar som grus, sten och sand blandas med i materialet och försämrar bränslekvalitén. Taget denna hänsyn kan föroreningsgraden begränsas, vilket innebär en lägre askhalt och därigenom en högre bränslekvalitet. Lagringen bör vara utformad så att olika sortiment lagras separerade från varandra. Eftersom lagring av bränsleblandningar medför en högre risk för oönskade processer, så som temperaturutveckling till följd av en utjämning av fukt och omblandning av biomassa med olika egenskaper (Trygg-Hansa 2009). Därutöver bör lagringsplatsen ligga i vindskyddat läge och stacken bör även vara placerad som en limpa med långsidan längs med den vanligaste vindriktningen. Detta för att vindpåverkan ska bli så minimal som möjligt och för att samtidigt öka bränslekvalitén. Höjden på stacken har även en effekt och påverkar den naturliga kompakteringen och permeabiliteten inuti stacken, vilket innebär att temperaturen inuti en stack ökar vid ett ökat tryck och värmen ackumuleras och påskyndar termokemiska processer. Denna ackumulering kan i värsta fall leda till självantändning. En okompakterad barkstack bör därför inte överstiga 7 meters höjd och en kompakterad stack bör inte överstiga 4 meters höjd. På större terminaler, där stora volymer lagras, bör avståndet mellan stackarna inte understiga 15 meter, räknat med en rasvinkel på 45 grader (Lehtikangas *et al.* 1998). Stackarna bör lagras maximalt 3 månader på en terminal och det gäller både för en okompakterad och en kompakterad barkstack (Bränslehandboken 2012).

Eftersom sammansättningen i bark skiljer sig mot andra delar av trädet samtidigt som att fukthalten är högre än i andra skogsbränslen gör detta att lagringen är betydligt svårare och mer problematisk. Bark är dessutom ett sönderdelat bränsle vilket i sin tur innebär en större exponerad yta per volym och en högre kompakteringsgrad. Ett ytterligare problem med lagring är relaterat till hopfrysning vid köldgrader under vintern då en hopfrusen skorpa i det yttre skiktet innebär att värme ackumuleras inuti stacken. Detta leder i sin tur till en ökad aktivitet inuti stacken (Lehtikangas *et al.* 1998).

1.3.1. Risker vid lagring

En stor nackdel med biobränslen, jämfört med fossilbaserade bränslen, är att hantering och lagring är mer komplex. Vid lagring kan fem olika mekanismer uppstå som påverkar materialförlusterna; celandning, biologisk nedbrytning, kemiska reaktioner, fuktutjämning och kompaktering (Krigstin & Wetzel 2016). Dessa reaktioner leder till en värmeutveckling inuti stackarna och kan i värsta fall leda till att materialet självantänds om inte den producerade värmen kan transporteras genom värmeöverföring från stacken nog snabbt. Dessa reaktioner leder till substansförluster, vilket påverkar energiinnehållet och leder till ekonomiska förluster, men det kan även leda till utsläpp av gaser i form av CO (kolmonoxid) och CO₂ (koldioxid). Nedbrytningshastigheten av biomassan påverkas av en rad olika faktorer, framförallt sammansättningen av den mikrobiella populationen, antalet arter, andelen tillgängligt kol, syrekoncentrationen, temperaturen, fraktionsstorlek och fukthalten på materialet. Även andra faktorer, så som lagringstiden, omgivningen, vilken typ av biobränsle det är samt geometrin och strukturen på den uppbyggda stacken påverkar nedbrytningshastigheten (Anerud *et al.* 2019). En direkt avgörande faktor som påverkar det slutgiltiga energiinnehållet är fukthalten. En låg fukthalt minskar risken för att biologiska-, kemiska- eller termiska reaktioner uppstår och genom att minska fukthalten kan substansförlusterna minskas. Att kunna styra fukthalten under lagring är därför en nyckelfaktor. Effektivare lagring leder till en sänkt fukthalt och på det sättet kan substansförluster minskas vilket leder till en ökad lönsamhet för biobränslena (Anerud *et al.* 2019).

Eftersom bark produceras och lagras under hela året, innebär årstidsvariationerna ett problem eftersom regn och snö kan påverka fukthalten på materialet. Stackar med en höjd på över 6 meter påverkas i lägre grad av omgivningens förhållanden än mindre stackar på under 3 meters höjd, detta för att höga stackar har en mindre exponerad yta i förhållande till sin totalvolym än små stackar. Återfuktning genom nederbörd är oundvikligt om stackarna inte täcks. Återfuktning leder till en högre fukthalt och ett lägre effektivt värmevärde samt ökad aktivitet i stacken. Den ökade

aktiviteten till följd av fuktvandring i stacken beror på att klimatet blir gynnsammare för vednedbrytande mikroorganismer. När bark lagras bör därför så små volymer som möjligt lagras under kortare tidsperioder (Lehtikangas *et al.* 1998).

1.4. Kompaktering

Kompaktering av bark och flis vid olika tryck är ett relativt okänt område och endast ett fåtal tidigare studier har utförts. Hassan & Reeves (1980) undersökte hur tryck påverkade temperatur och fuktighet i flis under ett 236 dagar långt försök. De visade att temperaturkurvan för okompakterat material var jämnare och konstant låg lite högre än den omgivande lufttemperaturen, medan temperaturkurvan för kompakterat material följde den omgivande temperaturen. Fukthalten i okompakterat material minskade med några procent under lagring, medan fukthalten i det kompakterade materialet var oförändrad. En annan studie inom samma område utfördes av Jirjis (2005), i studien studerades det hur höjden på barkstacken påverkade de processer som sker i stacken och hur de skiljde sig åt i olika nivåer i stacken. I studien undersöktes en 3 respektive 6 meter hög stack. Studien kom fram till att fukttinnehållet i den mindre stacken inte förändrades avsevärt under 3 månades lagring. I den stora stacken var det en större fluktuation av fukthalten, med en stor variation från topp till botten. Studien visade även att värmeutvecklingen i den stora stacken började accelerera när den omgivande temperaturen överskred 0 grader. I en annan undersökning Nurmi (1999) visades att effekten av kompaktering gjorde så att temperaturen inne i stacken sjönk med 15 grader jämfört med temperaturen i en stack som inte var kompakterad. Detta kan bero på att kompakteringen lämnade mindre syre för den metaboliska aktiviteten. Pari *et al.* (2015) påvisade en fördröjning i temperaturskillnaden mellan de understa lagerna i en stack till följd av kompaktering. Arnberg (2018) menar att en stack inte bör vara högre än 5–7 meter men därefter kan stacken byggas på längden. Detta skulle ge ett bättre luftgenomflöde och på så vis minska torrsubstansförlusterna. Hur olika tryck påverkar temperaturutvecklingen och substansförlusterna är idag ett outforskat område. Det finns idag ingen metod för att prognostisera aktiviteten i stacken och förutspå storleken på substansförluster utifrån dess volymförändring. Om volymförändringen skulle kunna koppla samman mot temperaturutveckling och substansförluster skulle detta kunna minska de negativa effekterna vid lagring och samtidigt effektivisera lagerhållningen av bränslen.

1.5. Volymskattning med drönare

Drönare, vilka oftast är utrustade med kameror och sensorer, har under senare år blivit en revolutionerande teknik med många olika användningsområden. Drönare, som både kan flygas manuellt eller helt autonomt, har sitt tekniska ursprung i det militära (Ehsani & Maja 2013). Idag används de allt mer inom den civila marknaden för olika typer av undersökningar och mätningar. I en studie Ronkainen (2016) där volymen av kolhögar uppmätta med drönare och traditionell LIDAR mätningar visade att mätningarna kunde utföras mer noggrant med drönare än med LIDAR teknik. Drönartekniken var samtidigt mer tillgänglig eftersom mätningarna kunde utföras snabbare än vid traditionell LIDAR teknik då drönare kunde flygas autonomt medan LIDAR utrustningen innebar upprepade förflyttningar av utrustningen för att fånga kolhögens alla sidor. Volymmätning med drönare innebär även att mätningar kan utföras oftare, vilket leder till en högre kvalitet på aktuella lagersaldon.

1.6. Problemformulering

Substansförluster och naturlig kompaktering är ofrånkomligt vid lagring av biobränslen på terminal. Genom att öka kunskapen kring lagring kan såväl torrsubstans- och energiförluster samt risker relaterat till brand minskas. Kunskap kring lagringsprocesser och hur bränslekvalitet och energimängd påverkas av hantering och utformning av stackar över tid kan ligga till grund för modeller. Andra faktorer som kan komma att bli betydande vid studier av substansförluster och energivärde är den naturliga kompakteringsgraden över tid i och med att såväl volymen som densiteten ändras.

Problem idag är dels osäkerhet kring lagersaldon, och att stackar ofta hanteras efter principen först in först ut. Istället för att optimera lagringstiden och få ut maximalt energiutnyttjande och minimala förluster för olika sortiment. Om stacken inte förbränns vid rätt tidpunkt ökar risken för mikrobiell aktivitet, vilket i sin tur leder till substansförluster. Om ett energivärde skulle kunna kopplas till hur stacken kompakteras över tid skulle detta problem kunna lösas. Problemet idag är att detta inte har undersökts tidigare, vilket gör att det finns en kunskapslucka inom området.

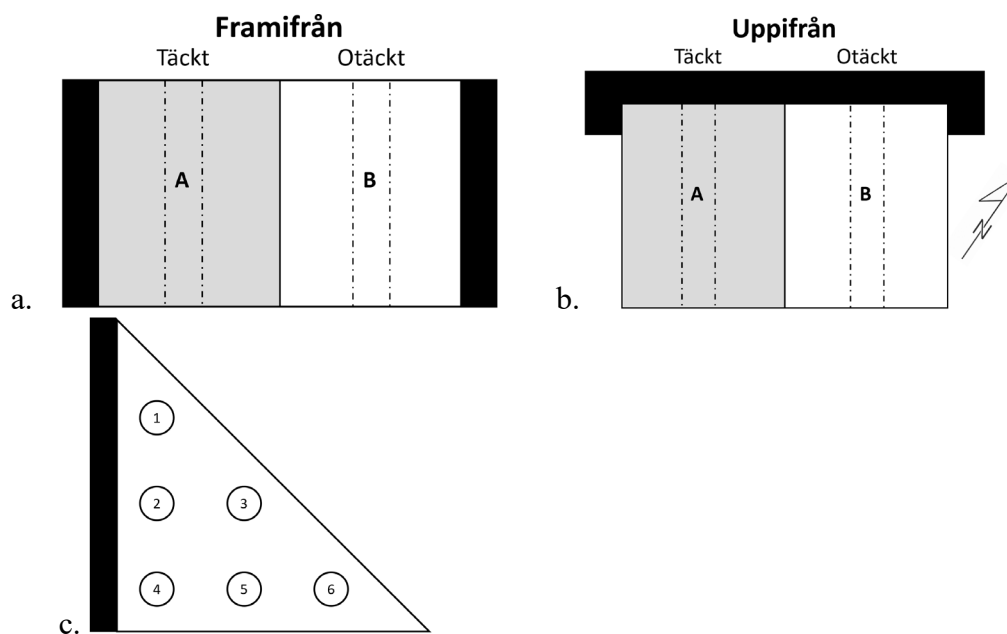
1.7. Syfte och mål

Målet med studien är dels att undersöka naturlig kompaktering under lagring och hur barken kompakteras vid olika tryck och temperaturer. Att utvärdera metoden för att uppskatta substansförlusterna skattade med hjälp av nätpåsar jämfört med den totala förändringen i torr massa under lagring.

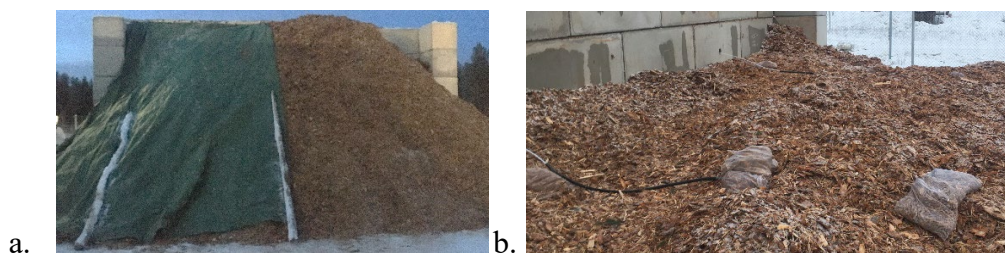
2. MATERIAL OCH METOD

2.1. Fältförsök

Ett barklagringsförsök genomfördes på Älvsbyn energis bränsleplan i Älvsbyn norra Sverige (65°40.53'N, 20°58,10'E) under perioden december 2019 till april 2020. Barken utgjordes uteslutande av tallbark (*Pinus Sylvestris*) och var en färsk restprodukt från det närbelägna sågverket i Munksund. Barken byggdes i fyra lager mot en mur (Fig. 1a, Fig. 2a). Den totala volymen bark uppgick till 223,4 m³ med bulkdensiteten 264,1 kg/m³. Halva barkstacken täcktes därefter med en semipermeabel duk, Toptex®, medan den andra halvan lämnades otäckt (Fig. 1a, 1b). Initialt samlades prover in för bestämning av bränslekvalitetsparametern fukthalt. Tre prover per provpunkt togs varav hälften av varje prov lades i en pappåse för framtida analyser medan den andra hälften lades i nätpåsar med 3 mm hål och vägdes. Nätpåsarna lades därefter tillbaka vid provpunkterna för beräkning av substansförluster (Fig. 1c). Totalt placerades 36 prover ut i de två vertikala zonerna A och B se (Fig. 1c, Fig. 2b, Fig. 4).



Figur 1. a. Bild framifrån som visar försöksstackens, täckta delen (A) och den otäckta (B). A och B symboliserar var de två vertikala snitten är placerade. b. En bild uppfifrån som visar vilket väderstreck stacken är placerad i. c. bild i genomskärning av stackens vertikala provpunkter samt placering av temperaturgivare.



Figur 2. a. bild framifrån som visar på hur stacken såg ut efter byggnation. b. Utläggingsmönster av proverna i provpunkterna (bilden tagen mellan lager 1 och 2).

2.2. Volymmätning

Fotogrammetridata samlades in genom att använda en drönare av fabrikatet DJI Mavic 2 pro. Drönaren var utrustad med en Hasselblad kamera med 20 megapixel och 28 mm objektiv. Drönaren använde det interna globalt navigationssystem men även andra typer av system (GNSS). Dessa system gör att drönaren får en noggrannhet på $\pm 0,5$ meter i vertikalled och $\pm 1,5$ meter i horisontalled (DJI 2020). Vid insamling av data flyger drönaren på en höjd av 80 meter och stannar för varje bild. Bilderna överlappar vid flygningen med 80% i längdled och 80% i sidled. Drönarmätning nyttjades för volymmätning av stackens fyra olika lager. Fyra olika fotogrammetriska bilder analyseras i programvaran Agisoft metashape (Agisoft Metashape 2020). Genom att ta fram en mätbar 3D visualisering utifrån en sammanslagning av bilderna. Inledningsvis genomfördes en referensflygning över muren, vilken hade den kända volymen $46,04\text{m}^3$, detta för att kunna kalibrera programvaran för senare mätningar. Därefter genomfördes en flygning för varje lager bark som lades upp mot muren, totalt 4 lager. När det sista lagret lagts upp analyserades den totala volymen. Volymen kopplades därefter samman med antalet ton som tippats mot muren och utifrån detta beräknas stackens bulkdensitet.

2.3. Metod laboratorieförsök

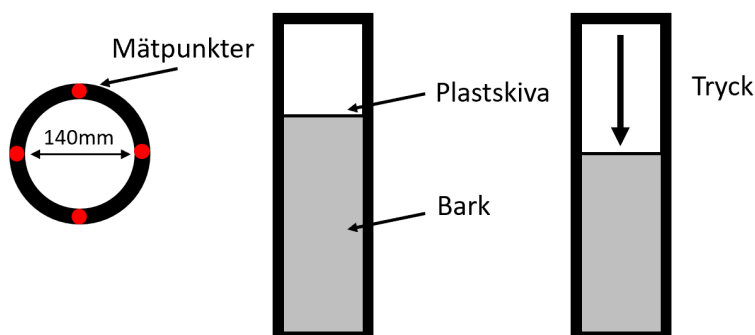
2.3.1. Laboratorieförsök

För att undersöka kompakteringsgraden vid olika nivåer i stacken genomfördes 3 laboratorieförsök syftande till att beskriva den naturliga kompakteringen vid olika temperaturer (0°C , 30°C och 50°C). Barken som användes vid laboratorieförsöken hade samma ursprung och egenskaper som barken som användes vid fältförsöket. Försöksledet med en temperatur på 0°C motsvarar förhållanden i de yttre delarna av stacken. En temperatur på 30°C en bit från mitten och 50°C förhållandet i

stackens mitt. I de 3 laborieförsöken genomfördes 3 upprepningar för varje behandling. Försöket för 30 °C och 50 °C utfördes i en bastu medan försöket för 0 °C utfördes i en lokal där temperaturen var omkring 0 °C.

För att undersöka och simulera ett förenklat försök som beskriver den naturliga kompakteringen vid olika förhållanden och nivåer i stacken användes rör med en inre diameter om 140 mm (Fig. 3).

Eftersom samma rör användes i samtliga 3 försök var volymen och arean för rören densamma. Rören fylldes med bark med en känd vikt (Tabell. 1). Volymen bark beräknades därefter genom att ta den totala volymen av röret minus mängden luft ovanför. Avståndet mättes från överkant på röret till en plastskiva som placerats på barken (Fig. 3). Mätningarna utfördes på fyra fastställda punkter från toppen av röret ned till barken och ett medelvärde beräknades därefter (Fig. 3).



Figur 3. Bilden till vänster är uppifrån och beskriver var provpunkterna är utplacerade. Bilden i mitten visar hur rören är fyllda och plastskivans placering i genomskärning, bilden till höger visar hur barken kompakteras under tryck

Bulkdensiteten för barken, vilken ligger till grund för viktbelastningen för 1 m extra stackhöjd beräknades enligt standarden SS-EN 14778-1. I försöket antogs att den totala belastningen skulle motsvara den naturliga belastningen i en 5 meter hög stack. Varje meter räknades fram till att motsvarade en belastning på 6 kilo för ett rör med arean 0,0154 m². Totalt belastades materialet i rören med 30 kg, vilket motsvarar 5 meters höjd. För att mäta kompakteringen användes en tumstock med millimeter (mm) gradering och eftersom materialet inte var fyllt hela vägen upp i röret mättes startpunkten från där materialet startade. Kompakteringen uttryckt i cm var därmed differensen från materialets utgångsläge i röret, fram till 30 kg viktbelastning. Kompakteringsgraden beräknades därefter som den procentuella volymförändringen. I försöken användes även en temperaturgivare (Tinytag) placerad i mitten av barken i varje rör för att undersöka hur temperaturen förändras då viktbelastningen ökade. Mätintervallet för Tinytagsen var 5 minuter och viktbelastningen varade i 10 minuter mellan varje mätning. För analysering och framräkning av förändring i volym, bulkdensitet och kompaktering användes

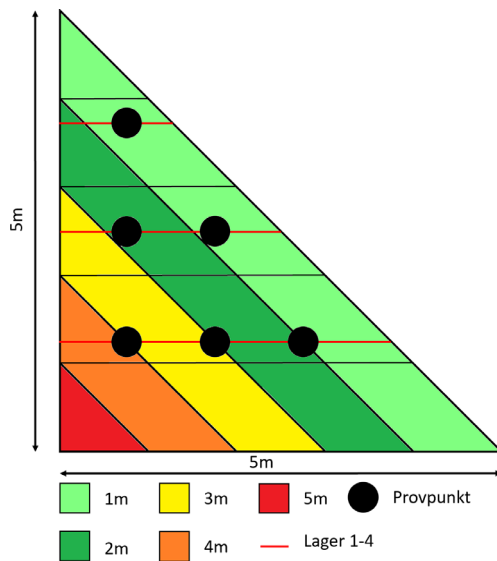
programvaran Excel. I Excel togs en trendlinje fram för totala kompakteringen samtidigt som ett R^2 - värde också räknades fram.

Tabell 1. Ingångsvariabler för de tre olika rören i vid temperaturerna 0°C, 30°C och 50°C

	Längd (cm)	Total Barkvikt (g)	Volym med barkmaterial (m ³)	Densitet (kg/m ³)
Rör (0°C)				
1	94,6	4434,8	0,0123	360,6
2	95,8	4438,2	0,0134	331,2
3	87,0	4442,0	0,0123	361,1
Rör (30 °C)				
1	94,6	3482,4	0,0092	380,2
2	95,8	3571,0	0,0100	355,5
3	87,0	3513,2	0,0097	363,7
Rör (50 °C)				
1	94,6	3627,2	0,0093	390,0
2	95,8	3314,2	0,0093	356,4
3	87,0	3278,4	0,0088	372,5

2.4. Teoretisk beräkning av kompaktering

Genom att utgå från resultatet i labbförsöken om hur kompakteringen av barken förändrades under olika temperaturer och tryck kunde en teoretisk modell tas fram (Ekv. 1). Genom att utgå från måtten på stacken delades stacken in i fem olika zoner baserat på djup (Fig. 4) där varje lager motsvarade ett ökat tryck på sex kg/0,0154m². Detta för att få fram samma yta som rören i labbförsöket för att kunna jämföra trycken mot varandra. Genom att räkna fram varje lagers teoretiska volym med utgångspunkt från den totalt uppmätta volymen går det att räkna ut hur mycket varje lager kompakteras ned till fem meters djup.



Figur 4. Beskrivning av hur de olika lagerna påverkas av tryck från det andra lagerna vid 1,2,3,4 respektive 5 meters djup. Tinytagsen var placerade på samma ställen som provpunkterna i stacken, de röda linjerna motsvarar de fyra lager stacken är byggd av vid uppsättning av försöket.

För att räkna ut kompakteringen beräknades ett medeltryck ut per lager, vilket baserades på trycket för varje enskilt lager adderat med trycket från den totala nederbörds mängden som fallit i form av snö under försöksperioden. För att beräkna trycket från nederbörden användes data från Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut. När medeltrycket per lager hade fastställts användes mätdata för temperaturen vid de olika lagren för att avgöra vilken linjär formel som skulle användas för de olika djupen i stacken (Tabell 4). De linjära funktionerna beskriver kompakteringen i procent vid olika tryck för enskilda lager och den totala kompakteringen för stacken baseras på en sammanvägning av kompakteringen i olika lager (Ekv. 1).

$$\text{Ekvation 1. } \sum_{n=1}^5 (1 - (M_t * \text{Temp}_{ekv})) / 100 * V_n$$

Där M_t är medeltrycket för lagren (1,2,3,4,5), Temp_{ekv} beskriver vilken temperaturlinje som skall användas för uträkning av procentsatsen. V_n beskriver volymen för lagerna n (1,2,3,4 och 5).

Volymförändringen är kopplad mot temperatursumman i stacken (Ekv. 2). Genom att mäta volymen av stacken under lagringens gång går det att räkna ut vilken temperatursumma stacken har. Temperatursumman är beräknad genom att ta den genomsnittliga dagstemperatursumman i stacken från försökets startpunkt till slutpunkt.

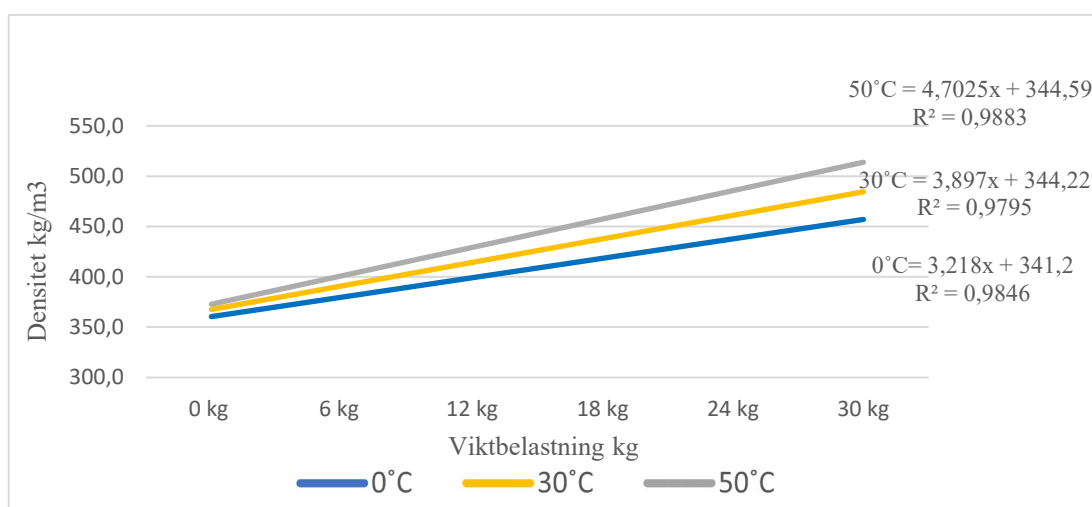
$$\text{Ekvation 2. } \text{Temperatursumma} = \frac{V_{in} - V_{ut}}{\text{konstant}}$$

V_{in} beskriver vilken ingångsvolym stacken hade vid försökets start och V_{ut} beskriver vilken volym stacken hade när försöket avslutades. Konstanten är uttryckt som $\text{m}^3 \text{ bark/grad } ^\circ\text{C}$. Konstanten är uträknad genom att ta stackens totala volymförändring och dividera den med den totala medeltemperatursumman från de tre olika lagren botten, mitt och topp.

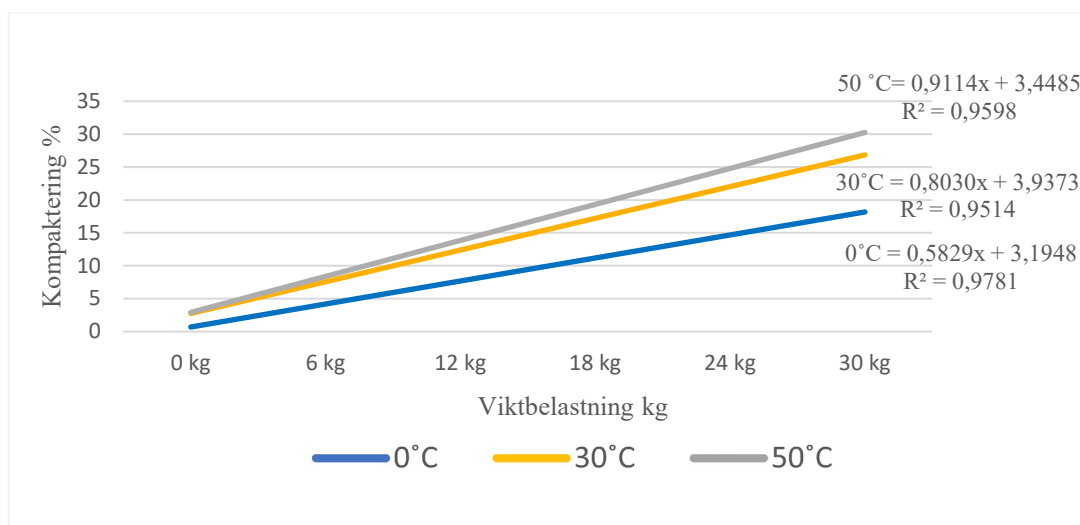
3. RESULTAT

3.1. Kompaktering av bark i 0°C, 30°C & 50°C

Barken kompakterades olika mycket beroende på den omgivande temperaturen (Fig. 5). Initialt var bulkdensiteten för försöket som utfördes vid 0°C 361,1 kg/m³ och efter 30 kg belastning, vilket motsvarar en stackhöjd på 5 m, erhöles en densitet 455,2 kg/m³. Kompakteringen vid 0°C kan beräknas med ekvationen $3,218x + 341,2$ där x motsvarar antal kg/0,0154 m² som belastas. R²-värdet för ekvationen (0,9846) visar att 98,46 % av densitetsförändringen kan förklaras av viktbelastningen. Densitetsförändringen motsvarar en total kompaktering på 17,4 % se (Fig. 6). För försöket som utfördes vid 30°C var ingångsdensiteten på barken 359,6 kg/m³ och efter 30 kg belastning erhöles en densitet på 476,9 kg/m³. Totala kompakteringen motsvarar 24,6 % (Fig. 6). En ökning i densitet är ett annat sätt att se kompakteringen. Kompakteringen vid 30°C kan beräknas med ekvationen $3,879x + 344,22$, där x motsvarar antal kg/0,0154 m² och med en förklaringsgrad på 97,95 %. Innan viktbelastning hade barken i försöket vid 50°C en densitet på 365,1 kg/m³ och efter total belastningen en ny densitet på 508,4 kg/m³. Ekvationen för kompaktering vid 50°C är $4,7025x + 344,59$, där x är viktbelastning i kg/0,0154m² och med en förklaringsgrad på 98,83 %. Kompakteringen vid 50°C är på totalt 28,2 % (Fig. 6).



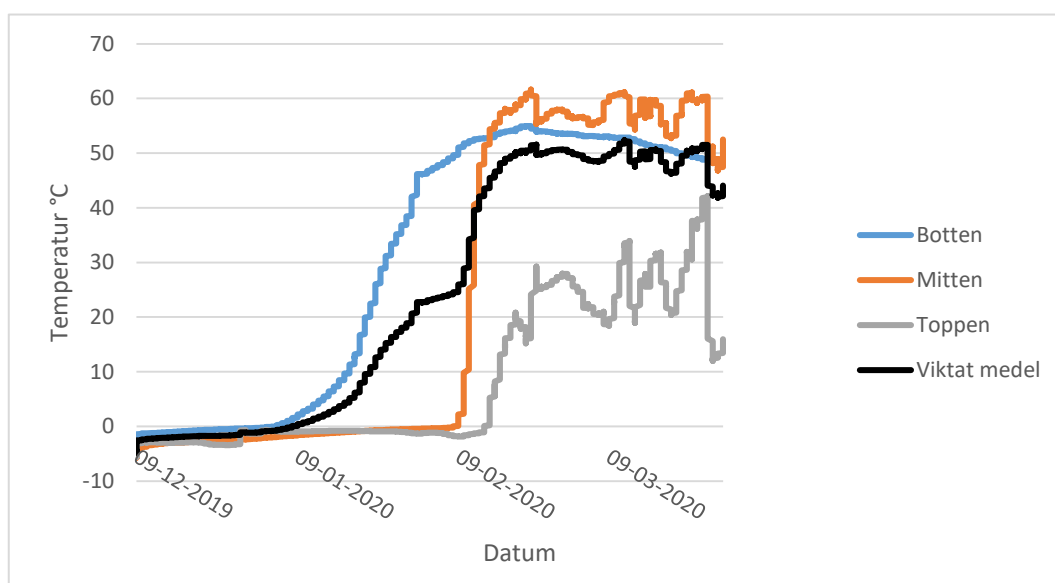
Figur 5. Densitetsförändring vid 0°C, 30°C och 50°C vid olika tryck



Figur 6. Kompaktering i 0°C, 30°C & 50°C uttryckt i % vid olika tryck

3.2. Naturlig kompaktering - Fältförsök

Under försöket var den ackumulerade nederbörden 111,4 mm, vilket motsvarar ett ytterligare tryck på 1,7kg/0,0154m² genom hela stacken. Den viktade medeltemperaturen för stacken ökade under de två första lagringsmånaderna från -4,4°C till ca 50°C och fluktuerade därefter runt 50 °C under den resterande delen av försöket (Fig. 7). Värmeutvecklingen startade först efter cirka 1 månad i bottenlagret och fortsatte därefter att öka under en månads tid innan den kulminerade. Temperaturen i botten låg därefter inom intervallet 50–55°C. I mittenlagret och toppen ökade temperaturen först efter cirka 2 månader. I det mittersta lagret ökade temperaturen inledningsvist exponentiellt för att sedan fluktuera mellan 55–60°C. Temperaturen i topplagret översteg endast ett fåtal gånger 40°C och låg mestadels inom intervallet 20–30 °C (Fig. 7). Temperatursumman ökade för hela stacken med 55,65 °C för varje m³ som barken kompakterades med. I samband med att försöket avvecklades var den ackumulerade dygnstemperatursumman för hela stacken 2786,2 °C.



Figur 7. Temperaturutveckling i botten, mitten och toppen samt viktat medelvärde för hela stacken

Insamlad data från fältförsöket i Älvsbyn påvisade förändringar i uppsatta variabler efter lagring (Tabell 2). Den genomsnittliga fukthalten på barken var 54,92 % vid försökets start och 55,55 % efter lagring. Volymen som uppmättes med drönare minskade från 223,4 m³ till 173,3 m³ (-22,4%) under lagringsperioden. Bulkdensiteten ökade med 17,6%, under lagringen medan den råa vikten minskade med 5,85%. Torrsubstansen, beräknad utifrån nätpåsar, minskade med 6,53% och den torra vikten på hela stacken beräknad från totalt invägt material och erhållna fukthalter minskade med 6,7%.

Tabell 2. Startvärden och slutvärden för fältförsöket i Älvsbyn, samt förändring i procent

Variabler	Start (9/12–19)	Slut (31/3–20)	Förändring under tiden (%)
Bulkdensitet (kg/m ³)	264,1	320,5	+17,6
Volym (m ³)	223,4	173,3	-22,4
Vikt (råton)	59	55,55	-5,85
Vikt (torrton)	26,59	24,82	-6,7
Fukthalt (%)	54,92	55,31	+0,39
Substansförluster (%) *	-	6,53	-6,53

* Substansförluster beräknat från nätpåsar.

3.3. Teoretisk kompaktering av en stack

Den teoretiska volymen för de olika lagren är framräknad utifrån den totala volymen och därefter multiplicerad med den procentsats varje lager motsvarar. Det

framräknade medeltrycket är baserat på det trycket som lagret belastats med från varje lager ovanifrån samt snötrycket (Tabell. 3). Temperaturformeln för lagerna är baserat på provpunkterna och genom att jämföra (Fig 4) där provpunkterna är placerade går det sedan att översätta de till (Fig. 7).

Tabell 3. Beskrivning av antalet m^3 bark som varje lager bestod av, medeltrycket beskrivet i $kg/0,0154m^2$ samt vilken temperaturekvation som användes för beräkning av kompakteringen per lager

Lager (m)	Volym (m^3)	Medeltryck ($kg/0,0154m^2$)	Använd temperaturekvationen ($^{\circ}C$)
1	80,415	3,857	30
2	62,545	9,857	50
3	44,675	15,857	50
4	26,805	21,857	50
5	8,935	27,857	50

Temperaturekvationen är framtaga utifrån de värden kompakteringen gav vid de olika temperaturer. Utefter det togs tre olika linjära ekvationer fram för att beskriva kompakteringen i procent vid olika tryck och temperaturer (tabell 4).

Tabell 4. Beskrivning av temperaturekvationerna för $0^{\circ}C$, $30^{\circ}C$ och $50^{\circ}C$

Temperaturekvationer		
0 grader $^{\circ}C$	30 grader $^{\circ}C$	50 grader $^{\circ}C$
$y = 0,5829x + 3,1948$	$y = 0,8030x + 3,9373$	$y = 0,9114x + 3,4485$

Den teoretiska volymen för stacken beräknades till $193,1 m^3$ vilket motsvarar en minskning med 13,6% genom att summera ihop stackens fem olika lager (Ekv. 1). Om substansförlusterna sedan tas med blev den nya volymen $180,5 m^3$ vilket då motsvarar en minskning med 19,2% summerat över hela stacken. Volymförändringen är ett resultat av naturlig kompaktering, vilket påverkas av aktiviteten i stacken. Teoretisk kan volymförändringen påvisa en aktivitet i stacken. Detta genom att koppla samman volymförändringen med temperatursumman (Ekv. 2). Om volymförändringen kopplas samman med temperatursumman går det att räkna fram hur mycket temperatursumman ökar för varje m^3 stacken kompakteras med. Sammantaget så ökar temperatursumman med $55,65^{\circ}C$ för varje m^3 stacken kompakterades.

4. DISKUSSION

4.1. Kompaktering i labbmiljö

Efter genomförandet av studien går det att se en tydlig skillnad på hur barken kompakteras vid olika temperaturer se (Fig. 5). Eftersom detta försök enbart är utfört på tallbark är de specifika värdena knutna till en specifik fukthalt, sönderdelningsform och trädart. Detta gör att det finns begränsningar med användandet av kompakteringsekvationerna för andra material som exempelvis flis och bark från andra träslag. Rören i laboratorieförsöket utsattes inte för några väderförändringar eller fukthaltsförändringar under försökets gång vilket försöksstacken i Älvsbyn gjorde. Detta kan i sin tur påverka hur barken kompakteras i rören mot för i stacken, där andra förhållanden råder. Det fanns även svårigheter med att hålla bastun på de exakta temperaturerna 30 °C respektive 50 °C vilket kan göra att försöket kan skilja sig något mot för verkligheten. Detta eftersom temperaturförändringen inuti stacken enbart förändras med någon decimal per timme, medan bastun kan fluktuera flera grader °C under försökets gång.

4.2. Naturlig kompaktering – Fältförsök

Studier gällande kompaktering av bark har inte genomförts i så stor utsträckning utan bara ett fåtal studier har genomförts och då på kompaktering av flis. I den tidigare genomförda studien av Hassan & Reeves (1980) har flis undersökts för att se hur temperaturen och fukthalten förändras under olika tryck. Resultatet i studien visade att fukthalten i en kompakterad flisstack var oförändrad jämfört med om stacken var okompakterad där fukthalten istället ökade under lagringstiden. Resultatet från det genomförda fältförsöket december-april visade på att fukthalten i hela stacken hade ökat med 0,39 %. Detta visar på att fukthalten under försöket har varit på en stabil nivå. I jämförelse mot den tidigare studien av Hassan & Reeves (1980) på flis där fukthalten var oförändrad vid kompaktering, tyder det på att försöket som genomfördes med bark också kompakterats under lagringstiden. Anledning till att fukthalten ökade minimalt kan ha att göra med att det kommit nederbörd i form av snö, som i kombination med köldgrader bildat en skorpa som lagt sig på stackens yttersta lager. Skorpan motverkade att vatten och fukt inte rann in i stackens mitt samtidigt som den gjort så att värmen stannade kvar inne i stacken och ackumulerades. Snön som fallit som nederbörd ökade trycket med 1,7

kg/0,0154m², vilket är en minimal påverkan. Andra förändringar som uppmättes under tiden materialet lagrats var att volymen minskat med -22,4 % från start till slut, samt en viktförlust på -5,85 %. Förlust i vikt betyder att en mikrobiell aktivitet kan ha uppstått under lagringen och då främst i bottenlagret och i det mellersta lagret där temperaturen varit över 50°C. Med en minskad volym och en minskad vikt så har även bulkdensiteten förändrats med 17,4%. Vid antagandet att värmevärdet för bark ligger på 1,55 MWh/ton, blir det för hela barkstacken från start av lagringen ett värmevärde på 91,5 MWh och efter lagring ett värmevärde på 86,1 MWh. Under lagringstiden har det blivit en förlust i värmevärde på 5,4 MWh, vilket motsvarar en förlust på 5,9 %. Temperaturutvecklingen i stackens olika lager är missvisande då temperaturen i botten varit högre i jämförelse med temperaturen i det mittersta lagret. Varför temperaturen har varit högre i botten är desto svårare att fastställa.

Metoden för att uppskatta substansförluster genom att använda nätpåsar jämfört med att väga allt material innan det förbränns visar att det är en liten skillnad mellan metoderna. Medelsubstansförlusten då metoden med nätpåsar användes uppgick till 6,53 % och medelsubstansförlusten i torr ton då hjullastare vägde in allt material innan förbränning uppgick till 6,7 %. Skillnaden mellan de två metoderna är mycket liten, vilket gör att invägning av torr ton kan tillämpas på värmeverk om man vill veta substansförluster som uppstått under lagringstiden. Metoden då man använder nätpåsar är mer fördelaktig om man vill veta substansförlusten i varje enskilt lager. Att använda metoden då man använder hjullastare och väger allt material vid invägning i torr ton kan vara mer fördelaktigt, då det kräver mindre arbete och tid än att gräva fram och analysera nätpåsarna. För att fastställa fukthalten på materialet med metoden nätpåsar togs prover av torrsustans ut på 13,54 kg, vilket är en liten andel.

Stacken i fältförsöket var byggd mot en mur. Att bygga stackar mot mur blir allt vanligare vid bränsleterminaler nära större anläggningar. Att bygga stack mot mur gör att vid en eventuell värmeutveckling och brand, kan stacken skärmis av från intilliggande stackar. Att bygga stack mot en mur jämfört mot att bygga stack enbart på plan utan mur som stöd kan ha en påverkan på hur stor kompakteringen för stacken blir. Den uppbyggda stacken i försöket hade en höjd på drygt 5 meter vilket är en standardhöjd när man bygger stackar idag.

Svagheter i fältförsökstudien är att det bara är en stack som är uppbyggd och placerad på terminalen i Älvsbyn. För vidare studier skulle fler stackar kunna placeras ut med samma höjd för att se hur temperaturen och kompakteringen utvecklas under tiden det lagrats, att även placera ut försök i olika delar av Sverige för att se hur mycket omgivande förhållanden påverkar kompakteringen vilket

skulle ge ett mer trovärdigt resultat. Det som också skulle kunna förbättras med studien gällande temperaturdata, är att i den uppbyggda stacken placera ut fler temperaturgivare och då kunna mäta temperaturen för varje meter i stacken. Detta skulle generera mer data som man senare kan koppla ihop med hur aktiviteten i stackens olika lager varit.

4.3. Teoretisk beräkning av kompaktering av stackar

Genom att jämföra volym vid start mot volym vid slut kan förändringen kopplas samman mot en aktivitet i stacken. Genom att använda (Ekv. 2) går det att ta fram en viss temperatursumma vid en viss tidpunkt genom att se hur mycket stacken har kompakterats. Detta går sedan att koppla samman mot aktivitet där en hög temperatursumma antyder på en hög aktivitet i stacken.

Om den totala kompakteringsgraden på -22,4% från det uppmätta värdet jämförs med det teoretiska värdet på -19,2% med substansförluster invägt finns det en skillnad på 3,2%. Denna skillnad kan bero på att kompakteringsmodellerna är baserade på rörförsök där det enbart är 10 minuter mellan varje mätserie. Detta kan göra att materialet möjligtvis inte hinner kompakteras lika mycket som ett rör som hade fått stå en månad eller fler månader. Det mittersta lagret kom även upp i en temperatur av nästan 60 °C (Fig. 7). Detta gör att kompakteringsekvationen kommer in på ett outforskat område i och med att temperaturer över 50 °C inte har undersökts. Det finns en tendens att barken kompakteras mer vid en högre temperatur, bör de innebära att barken troligtvis har kompakterats mer än ekvationen för 50°C vilket bör innebära en mindre slutvolym.

4.4. Slutsats

Slutsatsen av studien är att det inte är någon skillnad mellan att använda nätpåsar eller väga hela massan för att ta fram torrsubstansförluster. Det som också kan konstateras i studien är att om förändringen i stacken är känd går det att koppla samman med temperatursumman, som i sin tur kan kopplas samman med aktiviteten i stacken. Det som däremot inte går att avgöra är hur stora substansförlusterna blir under tiden och hur de påverkas av temperatursumman. Inom detta område skulle behövas ytterligare studier för att bättre beskriva aktiviteten i en stack under tid. Det skulle även behöva undersökas vidare hur kompakteringen blir vid en temperatur över 50 °C.

5. REFERENSER

- Agisoft Metashape (2020). *Agisoft Metashape*. Tillgänglig: <https://www.agisoft.com/> [2020-03-18]
- Anerud, E., Krigstin, S., Routa, J., Brännström, H., Arshadi, M., Helmeste, C., Bergström, D. & Egnell, G. (2019). Dry matter losses during biomass storage. s. 45
- Arnberg, J. (2018). *Torrsubstansförluster vid lagring och hantering av träspån vid Härjeåns Energi AB*. Karlstad: Fakulteten för hälsa, natur- och teknikvetenskap. Tillgänglig: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kau:diva-68326> [2020-03-05]
- Strömberg, B., Herstad Svärd, S. (2012) Bränslehandboken 2012. Stockholm: Värmeforsk (El för fordon-slutrapport). Tillgänglig: <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/sokmotor/Rapport1234.pdf> [2020-04-17]
- DJI (2020). *Mavic 2 - Specifications, FAQs, Videos, Tutorials, Manuals - DJI. DJI Official*. Tillgänglig: <https://www.dji.com/se/mavic-2/info> [2020-03-09]
- Ehsani, R. & Maja, J.M. (2013). The Rise of Small UAVs in Precision Agriculture. s. 2
- Hassan, A.E. & Reeves, R.H. (1980). Compaction of Wood Chips— Physical and Pulping Characteristics. *TRANSACTIONS of the ASAE*, s. 5
- Jirjis, R. (2005). Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy*, vol. 28 (2), ss. 193–201
- Krigstin, S. & Wetzal, S. (2016). A review of mechanisms responsible for changes to stored woody biomass fuels. *Fuel*, vol. 175, ss. 75–86
- Lehtikangas, P., Sveriges lantbruksuniversitet & Institutionen för virkeslära (1998). *Lagringshandbok för trädbränslen*. Uppsala: Sveriges lantbruksuniv.
- Naturvårdsverket (2020). *Utsläpp av luftföroreningar i Sverige*. (978-91-620-6915-5). Stockholm. Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publ-filer/6900/978-91-620-6915-5.pdf?pid=26325> [2020-03-16]
- Nurmi, J. (1999). The storage of logging residue for fuel. *Biomass and Bioenergy*, vol. 17 (1), ss. 41–47

- Pari, L., Brambilla, M., Bisaglia, C., Del Giudice, A., Croce, S., Salerno, M. & Gallucci, F. (2015). Poplar wood chip storage: Effect of particle size and breathable covering on drying dynamics and biofuel quality. *Biomass and Bioenergy*, vol. 81, ss. 282–287
- Ringman, M. (1995). Trädbränslesortiment. Sveriges lantbruksuniv. Tillgänglig: <https://www.slu.se/globalassets/ew/ew-centrala/forskn/popvet-dok/faktaskog/faktaskog95/4s95-05.pdf> [2020-03-16]
- Ronkainen, M. (2016). Designing a drone based measurement system for outdoor material fields in industrial environment. s. 72
- Svenskt trä (2017). *Skogsindustri - TräGuiden*. Tillgänglig: <https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/skogsbruk/skogsbruk/skogsindustri/> [2020-03-16]